面向第四代移动通信系统的空中接口技术仿真平台

田霖 孙刚 李玉凤 石晶林

摘要　本文首先分析了无线通信技术研究中常用的仿真方法和当前主流的仿真软件，然后对第四代移动通信标准进行了简介，最后重点阐述了中科院计算技术研究所无线通信技术研究中心研制的面向第四代移动通信系统的空中接口仿真平台，特别是该系统的整体架构、设计特点和关键技术，包括多场景支持、链路抽取方法及增强多天线技术等。

关键词　仿真平台；第四代移动通信；空中接口；链路抽取

1　引言

在无线通信系统中，空中接口技术是其最核心的部分。空中接口即通信实体之间的无线传输链路，包含 OSI[1]模型中的物理层和链路层。只有通过空中接口技术建立了无线链路，上层的协议和业务才能正确运行，因此空中接口技术是整个无线通信系统的基础。

目前，空中接口技术的研究主要集中在物理层的基带信号处理及链路层的无线资源管理两大方面。无论哪一方面的研究都需要对新的算法和技术方案进行验证和分析。空中接口技术的研究手段主要有三种：分析方法、实验方法和仿真方法。分析方法主要从理论上进行验证，但当系统复杂时无法进行详细描述，有效性得不到保证；实验方法需要搭建接近真实环境的试验床，受制于成本，因而实验规模有限，灵活性差；而仿真方法可以弥补前两种方法的不足，通过仿真平台和合理的模型，使用相对较少的时间和费用对技术进行较大规模的实验。因此，要进行空中接口技术的全面深入研究，实现关键技术创新，对理论成果和算法的仿真验证必不可少。

移动通信系统已经开始从第三代（3G）向第四代（4G）演进。3GPP[2]等国际标准化组织正在制定 4G 标准，国内外学者也围绕 4G 系统开展新技术的研究。面向第四代移动通信系统的空中接口技术仿真平台通过对无线信道、链路、系统的精确仿真，可以为技术方案和理论成果提供验证手段，是进行 4G 系统研究的基础平台。虽然大部分企业和研究机构都会进行单一算法的仿真验证，但真正拥有系统仿真平台的单位很少。本文将详细阐述中科院计算所研制的面向 4G 的空中接口技术仿真平台系统架构和仿真机制：其中，第二部分首先分析常用的仿真方法和当前主流的仿真软件；第三部分给出 4G 空中接口仿真平台的整体架构；第四部分对仿真平台中的关键技术进行介绍；最后做出总结。

2　仿真方法与工具

2.1 仿真方法介绍

在空中接口技术的研究中，根据研究问题的着眼点不同，无线通信系统的仿真通常分为

[1] Open System Interconnection，开放系统互连
[2] 3rd Generation Partnership Project，第三代合作伙伴计划

链路级与系统级仿真两大类。

链路级仿真的主要目的是检验不同无线传输技术方案的性能，而不对系统的典型行为做出任何结论性评价[1]。此时关注的目标是在单个无线连接上采用不同空中接口技术带来的性能差异。链路级仿真的输出是错误概率（如 BER[3]、BLER[4]或 FER[5]）与 SINR[6]的关系。

系统级仿真的主要目的是根据链路级仿真得到的基本性能数据，得出在一定服务质量条件下的系统容量和频谱效率，反映出利用所研究的无线传输技术组成的通信系统的容量/效率等指标。因此，系统级仿真通常需要建立包含多个基站和多个终端的仿真网络，对整个系统表现出来的各项性能统计指标进行考察。

系统级仿真具有以下特点：

– 系统级仿真是对用户的随机行为进行仿真的随机过程的组合；
– 系统级仿真的运算量比较大，时间成本高，实现复杂度是很重要的指标；
– 由于受到实现复杂度的限制，需要按重要程度对参数和过程进行取舍，系统级仿真通常都会做一些条件设置（比如链路级的仿真结果、协议中的规定值、人为设置的经验值等），进行一些合理假设，因此，仿真结果都是在这些假设前提下的结果。

系统级仿真方法又可分为两大类——静态仿真法和动态仿真法。两类方法分别具有各自的一些特点，这些特点决定了它们各自适用的情况。

2.1.1 静态仿真方法

静态系统仿真将整个系统的运行行为视作多个时间片断内所表现出来的行为样本的统计平均，每个时间片断称为一个快照（Snapshot）。在每个快照中，用户位置被静态地随机确定，且独立于上一个快照中用户的位置和速度。每个用户连接到网络的能力通过迭代过程来计算，直到满足收敛条件，再通过使用蒙特卡罗方法对快照进行分析，最后得到被仿真系统的近似实际性能。它体现了系统在短期内相对稳定的行为，仿真效率较高。但是由于采用了比动态仿真算法更多的假设以减少计算量，所以仿真准确度不高。

2.1.2 动态仿真方法

动态系统仿真通过连续的时间步仿真出用户在网络中的移动性和其它特性，综合所有可能的因素，可以构成一个时间驱动的仿真机。随着仿真时间的推进，用户位置会不断进行动态更新，且随时都可能有用户发起呼叫或断开连接，与之相关的各项参数，如接收和发送的功率、干扰水平、路径损耗等也需要通过动态计算得到。因此，动态系统仿真需要大量的计算成本和时间成本。

2.2 仿真工具介绍

2.2.1 OPNET Modeler

OPNET Modeler 是 OPNET Technology 公司的网络仿真软件产品。它主要面向的用户为网络设计专业人士，帮助客户进行网络结构、设备和应用的设计、建设、分析和管理，能够满足大型复杂网络的仿真需要。

[3] Bit Error Rate,误比特率
[4] Block Error Rate,误块率
[5] Frame Error Rate,误帧率
[6] Signal-to-Interference plus Noise Ratio,信干噪比（信号与干扰加噪声比）

OPNET Modeler 软件功能比较完备，可以对分组的到达时间分布、分组长度分布、网络节点类型和链路类型等进行很详细的设置，而且可以通过不同厂家提供的网络设备和应用场景来设计自己的仿真环境，用户也可以方便地选择库中已有的网络拓扑结构。

但是 OPNET 价格昂贵，入门门槛很高；在网络仿真规模和流量很大时，仿真效率会降低；另外模型库比较有限。

2.2.2 NS2[7]

NS2 是由美国加州大学伯克利分校开发的一种面向对象的网络仿真器，本质上是一个离散事件模拟器。它自身有一个虚拟时钟，所有的仿真都由离散事件驱动。NS2 使用 C++和 Otcl 作为开发语言。由于效率的原因，NS2 将数据通道和控制通道的实现相分离。为了减少分组和事件的处理时间，事件调度器和数据通道上的基本网络组件对象都使用 C++写出并编译，这些对象通过映射对 Otcl 解释器可见。

NS2 设计的出发点是对网络进行仿真。它集成了多种网络协议、业务类型、路由排队管理机制、路由算法、组播业务和应用于局域网仿真的部分 MAC[8]层协议。

NS2 的缺点是需要在 Linux 系统下安装使用；最适用于 TCP[9]层以上的模拟；界面功能易用性较差。

2.2.3 MATLAB[10]

MATLAB 软件是由美国迈斯沃克（Mathworks）公司推出的用于数值计算和图形处理的科学计算系统环境。MATLAB 集成了程序设计、数值计算、图形绘制、输入输出、文件管理等各项功能。MATLAB 提供了一个人机交互的数学系统环境，该系统的基本数据结构是矩阵，在生成矩阵对象时，不要求作明确的维数说明。

MATLAB 具有丰富强大的数学函数库，从而可以节省大量的编程时间。MATLAB 还具有很强的功能扩展能力，与它的主系统一起，可以配备各种各样的工具箱，以完成一些特定的任务。

Matlab 的缺点是执行速度比较慢，不能实现端口操作和实时控制，但结合 C++ Builder 运用，可以实现优势互补。

2.2.4 CASSAP

CASSAP 由美国新思科技（Synopsys）公司开发，主要应用于数字信号处理和网络通信领域，它可以在概念、体系结构、算法三个层次上实现仿真。其设计思想为自顶向下(Top—Down)的设计方法，即先进行系统性能分析、算法分析，再进行硬件、软件划分、设计，最后将软、硬件合并、仿真、调测、验证之后，最终完成系统设计。

2.2.5 SPW

SPW 仿真软件是益华电脑（Cadence）公司的产品。它提供了面向电子系统的模块化设计、仿真及实施环境，是进行算法开发、滤波器设计、C 代码生成、硬/软件结构联合设计和硬件综合的理想环境。

[7] Network Simulator version 2,一款网络仿真软件
[8] Medium Access Control,媒体接入控制
[9] Transmission Control Protocol,传输控制协议
[10] MATrix LABoratory,网络矩阵实验室

SPW 的一个显著特点是它提供了 HDS[11]接口和 Matlab 接口。Matlab 里面的很多模型可以直接调入 SPW，然后利用 HDS 生成 C 语言仿真代码或者是 HDL[12]语言仿真代码。SPW 通常应用于无线和有线载波通信、多媒体和网络设计与分析等领域。

综上所述，CASSAP 和 SPW 软件通常用于链路级和需要软硬件交互的环境。在主流系统级仿真工具中，OPNET 主要用于企业或专业级仿真；NS2 可用于多种 IP 网络协议和路由算法的仿真；Matlab 库函数丰富易于上手，而且得到多个公司的软件、硬件、仪器等支持，应用比较广泛。研究者可以根据仿真需求不同选择适合的仿真工具。

3　平台整体方案

3.1 标准简介

2008 年上半年，ITU[13]在关于 4G 愿景规划的基础上完成了具体的系统技术要求[2]，并正式发出“通函”在全世界范围内征集 4G 候选技术提案。由此开始了对 4G 技术的国标标准化过程。其中，4G 系统要求在 4×4 MIMO[14]，传输带宽大于 70MHz 的条件下，获得 1Gbps 以上的峰值速率；在峰值频谱效率方面，下行要求达到 15bps/Hz，上行达到 7.5bps/Hz。对 4G 峰值速率更准确的说明为：在高速移动场景达到 100Mbps，低速移动场景为 1Gbps。

目前，3GPP 的 LTE-Advanced（简称 LTE-A）和 IEEE 802.16m 是提交到国际电联的两个主要 4G 候选标准。3GPP 的 LTE-A 标准是从 WCDMA 和 TD-SCDMA 演进而来的。我国将全力支持 LTE-A 标准，本文仿真平台面向的 4G 标准即 LTE-A 标准。以下将简要介绍该标准的技术特点。

为达到 ITU 提出的 4G 系统性能指标，LTE-A 主要引入了四大类增强技术，分别是：载波聚合(Carrier Aggregation)、增强 MIMO、CoMP[15]和中继(Relay)[3]。

- **载波聚合**

  ITU 要求 4G 系统的最大带宽不小于 40MHz。基于 WRC07 会议的结论，LTE-A 的潜在部署频段包括：450MHz-470MHz、698MHz-862MHz、790MHz-862MHz、2.3GHz-2.4GHz、3.4GHz-4.2GHz、4.4GHz-4.99 GHz 等，除了 2.3GHz-2.4GHz 位于传统蜂窝系统常用的频段外，新的频段呈高、低分化的趋势。考虑到现有的频谱分配方式和规划很难找到足以承载 4G 系统带宽的整段频带，3GPP 确定采用载波聚合技术，聚合两个或更多的基本载波，从而解决 4G 系统对频带资源的需求。载波聚合的基本频率块称为单元载波，除了优先支持连续频谱聚合外，也同时支持非连续频谱聚合。

- **增强多输入多输出（MIMO）技术**

  为满足 4G 对峰值频谱效率和平均频谱效率的要求，多天线增强是 LTE-Ad 采用的关键技术之一。LTE-A 的前身 LTE 下行支持 1、2 或 4 根天线发射，终端侧支持 2 或 4 根天线接收，下行可支持最大 4 层传输。上行只支持终端侧单天线发送，基站侧最多 4 天线接收。LTE 的多天线发射模式包括开环 MIMO，闭环 MIMO，波束成型以及发射分集，都采用预编码的方式实现。LTE-A 在 LTE 的基础上，上下行都扩充了发射/接收

[11] Hardware Design System, 硬件系统设计系统,现在是 SPW 的集成组件之一
[12] Hardware Description Language, 硬件描述语言
[13] International Telecommunication Union, 国际电信联盟
[14] Multiple Input Multiple Output, 多输入多输出
[15] Coordinated Multiple Point transmission and reception,协作多点传输与接收

支持的最大天线个数，允许上行最多 4 天线 4 层发送，下行最多 8 天线 8 层发送，因此 LTE-A 中需要考虑更多天线数配置下的多天线发送方式。

– **协作多点传输与接收（CoMP）**

CoMP 将作为 LTE-A 中提高小区吞吐量尤其是小区边缘吞吐量的重要手段。一个 CoMP 协作簇包括了不同地理位置的多个基站，彼此之间共享信道和调度信息。通过簇内基站之间的协作，将建立一个多小区的虚拟 MIMO 网络，使用现有的 MIMO 检测算法进行干扰消除。其中，CoMP 技术分为协作调度(CoMP-CS[16])和联合处理(CoMP-JP[17])两大类。在协作调度方式下，基站共享信道和调度信息，进行联合调度。在联合处理方式下，基站通过共享的信息，将小区间干扰作为有用信号进行联合处理。两种方式都能提高小区边缘用户的服务质量和吞吐量，使得整个网络用户感受速率更为平均。

– **中继**

LTE-A 引入中继（Relay） 来增加覆盖，提高小区边缘吞吐量。中继主要分为三类：L1 relay、L2 relay 和 L3 relay。L1 relay 是一个增强的直放站，实现物理层的放大转发功能；L2 relay 实现解码转发功能，转发 PDCP PDU、RLC、PDU、MAC PDU 和传输块，介于 L1 和 L3 之间，比无线回传的基站简单、价格低廉，但比直放站复杂。从协议功能上讲，L2 中继节点有一定的资源分配功能，但没有完整的第三层资源管理功能；L3 relay 是一个无线回传的基站，包含了完整的三层协议，转发 IP 包。目前在 3GPP 定义了 Type1 Relay（L3 Relay）和 Type2 Relay（L2 Relay）。

3.2 架构设计

本文仿真平台基于 Matlab 软件开发，以场景为线索，实现了单链路、单基站、多基站等环境下的仿真。实现时，在业务流特性、链路特性等方面，参照了现有的 LTE 标准，并融入了 LTE-A 中的 CoMP、增强 MIMO 等技术。在系统仿真时，采用了链路抽取的方法，达到了准确性和高效性的良好折中。

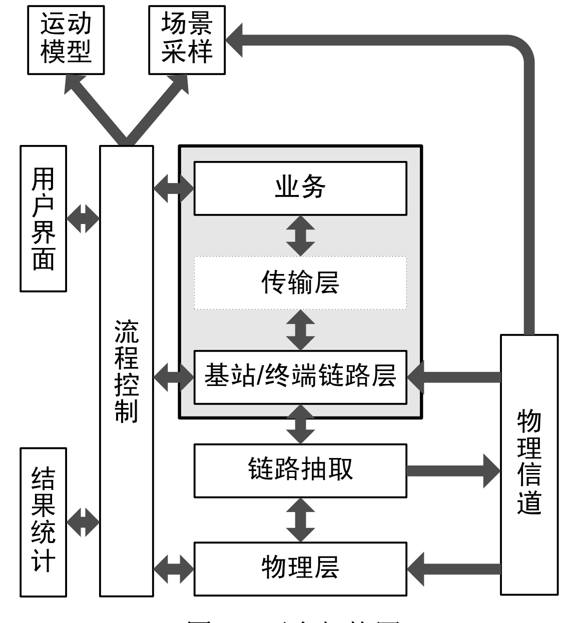


图 1. 平台架构图

图 1 是仿真平台架构示意图，主要包括用户界面、流程控制、结果统计、业务层、传输层、链路层、链路抽取、物理层以及物理信道等部分。其中，用户界面提供用户操作接口，获取用户输入，并将仿真结果信息以用户定义的方式进行显示（如图 2、图 3 所示）；流程控制模块控制仿真模式（链路级仿真还是系统级仿真），根据不同模式选择运行部件和流程；业务层产生包括 HTTP、FTP、VOIP 等协议的应用层数据流，管理业务流通信事务；链路层支持 LTE 标准定义的入网管理、数据调度、切换控制、HARQ[18]等功能，提供无线资源管理算法的可替换接口；链路抽取模块提供有效信干噪比功能映射和信干噪比

[16] CoMP- Coordinated Scheduling,协作调度
[17] CoMP- Joint Processing,联合处理
[18] Hybrid automatic repeat request, 混合自动重传请求

-误块率查询，支持的调制方式为 QPSK[19]/16QAM[20]/64QAM/256QAM，码率为 1/3，1/2，2/3，3/4，4/5；物理层基于 MIMO 和 OFDM[21]技术，实现了信道编码、交织、速率匹配、星座图映射、层映射、预编码、串并转换、导频插入、信道估计及其相应逆过程子模块；物理信道模块在支持 3GPP 推荐的 SCM[22]信道基础上，还提供瑞利、莱斯、典型城市信道（TU[23]）等信道的支持接口。

本文仿真平台具有以下主要特点：

1）. 低耦合的组件式设计

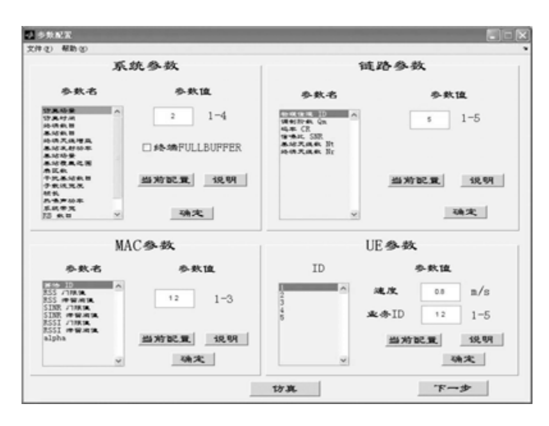
本仿真平台中空口接口功能部件可组合，接口清晰，核心算法替代方便。例如，仿真平台根据需求定义链路层核心功能，而不像通常标准那样划分功能模块。同时考虑到对系统仿真过程中不同算法之间比较的支持，每个核心功能都考虑了算法的灵活及可替代，并定义了较为通用的、具备良好扩展性的接口。

2）. 支持多种仿真方式

通过流程控制模块，灵活支持多种仿真方式。在链路级仿真中，如果是单个算法仿真，不考虑系统影响，则节点生成时只选择算法所属模块及必须的支持部件运行；如果是单个算法仿真，需要考虑系统影响，则选择完整的功能框架，修改算法所属模块；在系统级仿真中，不运行实际物理层，通过链路抽取模块模拟物理层性能。

3）. 丰富的算法统计分析功能

本仿真平台的结果统计模块抽象出无线移动通信技术研究中常用的性能参数，包括吞吐量、误码率、误帧率、包延时、丢包率、公平性因子、用户掉线率等，并提供这些参数的统计分析功能，从而避免了测试不同算法时统计相同参数的重复劳动，提高了仿真效率。



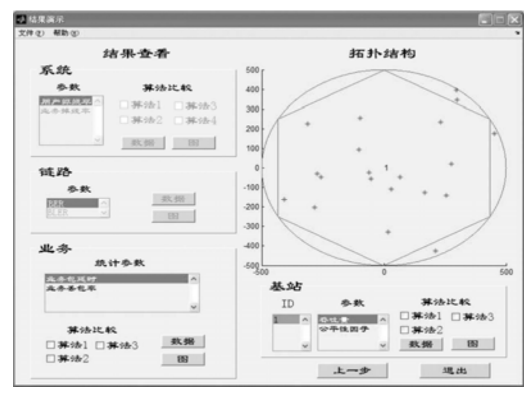



图 2. 运行参数配置界面

图 3. 结果显示配置界面

4 关键技术

[19] Quadrature Phase Shift Keying,正交相移键控或四相相移键控
[20] 16ary Quadrature Amplitude Modulation，16 位置正交幅度相位调制 64QAM 与 256QAM 则分别为 64 位置和 256 位置正交幅度相位调制
[21] Orthogonal Frequency Division Multiplexing, 正交频分复用
[22] spatial channel model
[23] typical urban channel

4.1 多场景支持

多基站多用户的仿真场景在空中接口技术系统级仿真中十分重要，使我们可以通过构建多个基站以及多个用户的环境，来模拟现实场景中的用户间干扰与协同、基站间干扰与协同、信道大尺度衰落等作用，以此来支持系统级的无线资源调度、基站间切换、基站协同等仿真。传统的多基站多用户的仿真场景构建，往往是针对特定的仿真需要。如 NS2 中提供的 802.11 协议模块针对的是固定无线局域网；OPNET 提供的 UMTS 模块针对的是移动通信网，都不能满足对多种协议特性仿真环境的设置和支持，体现的是某种协议的特定场景，失去了仿真场景构建的通用性和扩展性。

多基站多用户的仿真场景是用其中基站和用户数目的变化、两者之间的服务关系随时间的变化、两者之间传输条件的变化等模拟各种具体场景的出现。通常，特定的仿真总是在特定的基站和用户约束下进行的，无法重用于其他仿真场景，导致整体仿真的效率低下，通用性差。然而，在空中接口技术仿真中，大多都具备一些必须的数据实体，比如基站、用户、物理信道，同时也具备一些较通用的仿真工作流程，比如数据实体关系的初始化、实体关系随时间的更新等，这为实现一种通用性和扩展性良好的仿真方法提供了可能。

因此，本文仿真平台对多基站多用户场景的构建过程进行了对象和典型功能的抽取，以实现良好的通用性和扩展性。抽取的对象和功能实体包括基站维护模块、用户维护模块、场景初始化模块、场景更新模块、链路采样模块以及物理信道模块，具体阐述如下：

- 基站维护模块用于维护仿真环境中的基站实体。基站实体是指仿真场景中基站信息的记录实体，该实体所记录的信息包括物理信息和功能信息。物理信息包括扇区信息、覆盖范围信息、基站位置信息等。功能信息包括基站频率资源信息、负载信息、基站天线配置信息等；
- 用户维护模块用于维护仿真环境中的用户实体。用户实体是指仿真场景中用户信息的记录实体，该实体所记录的信息包括服务基站信息、用户位置信息、用户移动轨迹信息、用户负载信息、用户天线配置信息等；
- 场景初始化模块用于对所要仿真的场景做初始化操作，包括将整个仿真场景的配置设置到基站实体和用户实体中，同时，对仿真场景中没有配置的内容（如用户的运动轨迹，包括速度和运动方向、用户的位置等）进行随机初始化；
- 场景更新模块用于更新基站实体和用户实体中的信息，包括根据用户的运动轨迹对用户的位置进行更新，进而更新用户的服务基站和监听基站信息，以及基站的负载和服务用户索引等信息；
- 链路采样模块用于对当前时刻的用户实体中用户所监听的链路做链路信息采样，从用户实体和基站实体中获取链路的距离、角度等信息并输入给物理信道模块，从而获取链路的即时信道响应；
- 物理信道模块用于根据配置信息提供多种类型的物理信道响应，包括加性高斯白噪声信道、瑞利、莱斯、典型城市信道、空间信道模型及自定义的物理信道；

本文平台将数据和随时间变化的动态功能进行了分离，提供了一种相对通用的多场景支持流程：首先，根据仿真场景的定义，设置好基站实体和用户实体；然后，使用初始化模块来对整个场景进行服务关系初始化；进而，交替运用场景更新和采样模块，推动整个仿真场景的运行。

上述多基站多用户仿真构建的方法，给出了具备较强通用性和扩展性的场景构建架构，定义了各个模块的功能和工作流程以及模块间的协作工作流程。通过此方法，可以快速、灵活地构建研究中所需要的多基站多用户仿真场景，从而提供多场景的支持，提升了工作效率。

4.2 链路抽取方法

系统仿真多数是集中在多链路或者多基站的层次。这种仿真同时具备多条通信链路，其重点关注的是整个系统的公平性、通信容量、资源利用率等整体性能。如果系统仿真中使用链路仿真中的实际通信链路，则会使得仿真的时间变得无法接受。高分辨率和高时间宽度在系统仿真中是无法同时兼顾的。因此，必须在时间上将链路仿真从系统仿真中分离开来，降低系统仿真的时间复杂度。在这种情况下，就必须定义链路仿真和系统仿真之间的数据交互接口。对系统仿真来说，这个接口就是链路抽取产生的链路到系统映射（Link-to-System，L2S）接口，L2S 接口采用的方法就是链路抽取方法。链路抽取方法的引入，从时间上分离了系统仿真中的系统部分和链路部分，以数据计算的方式代替了蒙特卡洛的方式，在牺牲少量精度的同时，大大降低了系统仿真的时间复杂度。

传统的系统级仿真中，链路抽取可以使用平均值或真实值。然而，平均值方法在使用过程中存在较大误差，导致接口数据的精确性不够；而真实值接口方法，需要链路级和系统级仿真同时运行，根据系统级仿真来控制拓扑结构，然后利用链路级仿真来决定传输的数据是否正确。这样的接口方式虽然精度高，但系统十分复杂，大大限制了其应用。

在 4G 无线通信技术的研究中，物理层引入了 MIMO、OFDM 等新技术。这些技术势必对现有的仿真方法提出新的需求，原有的链路抽取方法已经不能很好地满足现有仿真的精度和效率要求。

在 4G 标准的研究过程中，有提案提出了以 ESM[24][4]为核心思想的一系列方法，如 EESM[25]、MIESM[26]，以及新出现的 MMIBESM[27]、BEESM[28]算法。ESM 算法的基本思想是将链路抽取方法分为两步来实现：第一步将多状态信道——这个多状态可以是多频率，可以是多时间，可以是多空间，同时也可以是频率、时间、空间的任意组合——映射为一个单状态信道，简化了复杂的物理层技术带来的信道条件的复杂度；第二步将单状态信道进行链路抽取。此方法的核心是第一步的转化，采用的是基于二进制传输和最大似然译码的等效切尔诺夫边界的原理。针对 OFDM 链路的验证证明了 ESM 方法的有效性和高效性。但是，这个原理的成立需要对物理层链路进行二进制编码以及最大似然译码的等效，因此，这个方法在运用的过程需要针对不同的物理层技术进行不同的等效分析。

针对不同的物理层，我们的仿真平台采取了不同的 ESM 方法：

– 单纯的 OFDM 链路

  采用 EESM 方法，有文献已经证明了 EESM 方法在 OFDM 链路中的有效性[5-6]。

– MIMO 链路

  分为两种情况：第一种是 MIMO 译码采用线性译码算法，由于线性译码可以很好地通过算术线性表达式等效到二进制传输上，因此采用 EESM 方法能够获得好的链路

[24] Effective SINR Mapping，有效信干噪比映射
[25] Exponential ESM，指数有效信干噪比映射
[26] Mutual Information ESM，互信息有效信干噪比映射
[27] Mean Mutual Information per-Bit ESM，平均互信息比特有效信干噪比映射
[28] Bit-wise Exponential ESM，比特指数有效信干噪比映射

抽取精度；第二种是 MIMO 译码采用非线性译码算法，采用修正的 EESM 算法，考虑到非线性译码算法没有译码输出的线性表达式，采用线性蒙特卡洛的方式，在 EESM 算法的基础上，加上了线性优化因子，获得效率和精度的折中。

– 混合自动重传请求（HARQ）链路

由于重传的特殊性，链路的抽取涉及到了时间分离的多次链路传输，因此需要考虑当前重传和上次发送信息的叠加。我们开发了一种混合自动重传链路的链路抽取方法，方法的核心思想是将不同的调制方式统一映射为相同的一种基础调制方式、将不同的数据编码速率转化为相同的一种基础数据编码速率，保证重传和上次传输的信息在调制方式和编码速率上能够归一化地进行信息叠加，直接将链路等效为符合 ESM 原理的链路，从而直接采取 ESM 算法。图 4 为混合自动重传链路抽取方法的示意图。

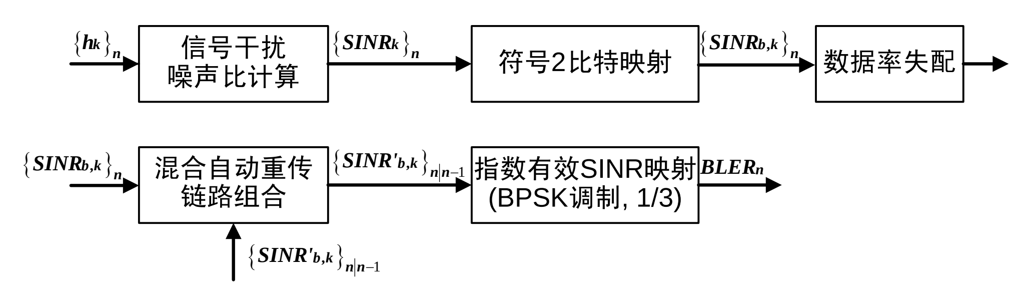


图 4. 混合自动重传链路抽取方法示意图

图 4 中主要参数的意义为：$\{h_k\}_n$ 表示第 **n** 次混合自动重传请求传输的资源粒子 **k** 上的信道响应；$\{SINR_k\}_n$ 表示第 **n** 次混合自动重传请求传输的资源粒子 **k** 上的信干噪比；$\{SINR_{b,k}\}_n$ 表示第 **n** 次混合自动重传请求传输的资源粒子 **k** 上的第 **b** 比特的信干噪比；$\{SINR'_{b,k}\}_n$ 表示第 **n** 次混合自动重传请求传输的资源粒子 **k** 上的第 **b** 比特的信干噪比，对应的码率为 1/3; $\{SINR'_{b,k}\}_{n-1}$ 表示第 **n**-1 次混合自动重传请求传输的资源粒子 **k** 上的第 **b** 比特的信干噪比；$\{SINR'_{b,k}\}_{n|n-1}$ 表示第 **n** 次混合自动重传请求传输的资源粒子 **k** 上的第 **b** 比特和上一次传输合并后的信干噪比；$BLER_n$ 表示第 **n** 次混合自动重传请求传输的误块率。

在采用了以上的链路抽取方案后，很好地覆盖了 4G 的核心物理层技术，能够对系统仿真提供高效、高精度的支持，大大提升了平台的适用范围。

4.3 增强 MIMO

4.3.1 上行多天线增强

LTE-A 上行除了需要考虑更多天线数配置外，还需要考虑上行低峰均比的需求和每个成员载波上的单载波传输的需求。

对上行业务信道而言，容量提升是主要需求，多天线技术需要考虑空间复用的引入。同时，由于发射分集相对于更为简单的开环秩为 1 预编码并没有性能优势，因此 LTE-A 标准最终确定上行业务信道不采用发射分集，对小区边界的用户等可以直接采用开环秩为 1 预编码。目前，用于预编码的 2 发射天线和 4 发射天线下的码本设计都已完成。

与 LTE 一样，LTE-A 的上行参考信号也包括用于信道测量的参考信号和用于信号检测的参考信号。由于上行空间复用及多载波的采用，单个用户使用的上行解调参考信号的资源开销需要扩充，最直接的方式就是在 LTE 上行参考信号使用的恒模零自相关码循环移位的基础上，让不同数据传输层的解调参考信号使用不同的循环移位；还有一种可能是在时域的多

个参考信号符号上叠加正交码来扩充码复用空间，标准最终采取了两种结合的方式[3]。

对于测量参考信号，为了支持上行多天线信道测量以及多载波测量，资源开销相对于 LTE 信号同样需要扩充，除了沿用 LTE 周期性测量参考信号发送模式以外，LTE-A 还增加了非周期测量参考信号发送模式，由基站触发用户发送，实现测量参考信号资源的扩充。

4.3.2 下行多天线增强

因为下行支持的传输层数的增加，码本设计的尺寸需要加大。在闭环 MIMO 情形，为了减少反馈开销，要采用基于码本的主索引的反馈方式。目前 8 天线码本的设计正在进行，初步趋势是采用双预编码矩阵码本结构，即把码本矩阵用两个矩阵的乘积表示。通常两个矩阵中一个是基码本，另一个是根据信道变化特征在基码本上的修正。为了进一步减少反馈开销，还可以考虑根据信道变化快慢不同的统计特征分别进行长周期反馈和短周期反馈[7]。

LTE-A 采用用户专用参考信号的方式来进行业务信道的传输，同一用户业务信道的不同层使用的参考信号以码分加频分的方式相互正交。

本文仿真平台支持 LTE 的 MIMO 及 LTE-A 的 MIMO 增强。图 5 是兼容上、下行 MIMO 及其增强的发射方案。在采用与 MIMO 匹配的层映射、预编码及参考信号时，能够得到当前的 MIMO 方式的发射信号。

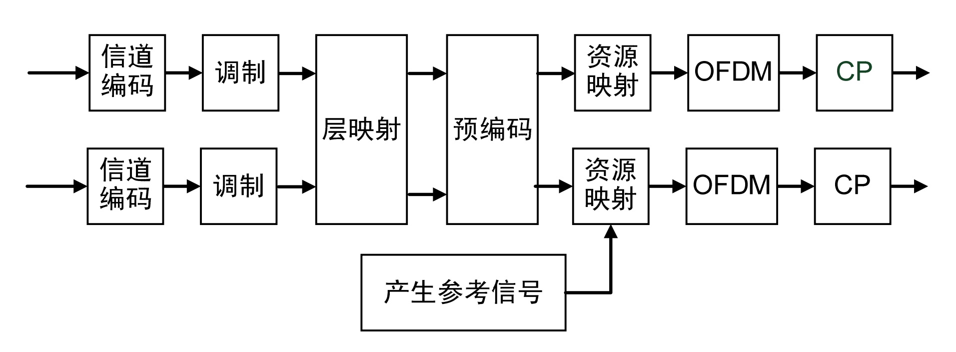


图 5. 发射方案

图 6 是兼容上、下行 MIMO 及其增强的接收方案。同样，当采用与发射 MIMO 匹配的解参考信号方法、解层映射的时候，能够解调出相应的信号。

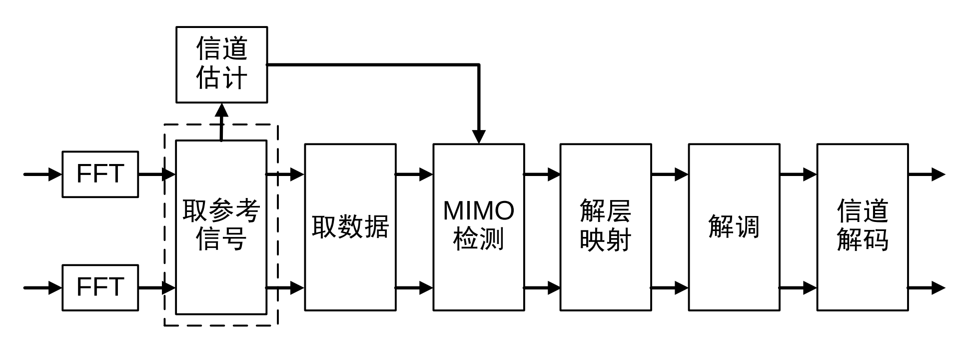


图 6. 接收方案

如上所述，一个兼容的发射和接收方案，不仅在 LTE 的 MIMO 的仿真链路上支持了 MIMO 增强的仿真，同时也保证了后续标准研究中对之前标准的后向兼容。

5 结束语

本文介绍的中科院计算所无线通信技术研究中心研制的面向 4G 的空中接口仿真平台包含 LTE / LTE-A 的链路级及系统级仿真，支持多小区、多用户、多业务、多信道及多种移动模型。该平台将为未来无线通信新技术研究及标准化工作奠定坚实的基础。

参考文献：

[1] 3GPP, 2009.12, “Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations” , TR 25.996

[2] ITU-R, 2008, “Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s)”, M.2134

[3] 3GPP, 2010.3 “Further advancements for E-UTRA physical layer aspects”, TR 36.814,

[4] 3GPP, 2003.10, R1-030999, “Consideration on the system performance evaluation of HSDP using OFDM modulations”, RAN WG1 #34

[5] 3GPP, 2003.11, R1-031303, “System evaluation of OFDM-further condsideration”, RAN WG1 #35

[6] L. Wan, et al, “ A fading insensitive performance metric for a unified link quality model,” WCNC 2006

[7] Samsung, 2010.3,R1-102199, “Design and performance evaluation of 8Tx Codebook”

作者简介：

田　霖： 中国科学院计算技术研究所无线通信技术研究中心 助理研究员
tianlindd@ict.ac.cn
孙　刚： 中国科学院计算技术研究所无线通信技术研究中心 硕士
李玉风： 中国科学院计算技术研究所无线通信技术研究中心 硕士
石晶林： 中国科学院计算技术研究所无线通信技术研究中心 研究员，博士生导师